УДК 620.179.13

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ТОМСКОМ НИИ ИНТРОСКОПИИ

В.П. Вавилов, В.Г. Торгунаков, В.В. Ширяев, А.И. Иванов, Д.А. Нестерук

Работы НИИ интроскопии при ТПУ в области теплового контроля, начатые в 70-х годах прошлого века, ориентированы на неразрушающий контроль и техническую диагностику изделий и материалов, а также специальные применения. Аппаратурную базу теплового контроля (ТК) составляют инфракрасные (ИК) системы измерения температуры, в особенности, тепловизоры. В настоящее время область наших исследований включает теоретические решения прямых и обратных задач теплопередачи, проектирование и мелкосерийный выпуск ИК сканирующих систем, разработку новых способов ТК и алгоритмов обработки нестационарной информации, а также техническую диагностику промышленных, энергетических и строительных объектов.

1. Сущность теплового метода неразрушающего контроля

Российский ГОСТ 18353-79 различает 9 видов неразрушающего контроля (НРК) согласно используемым физическим явлениям: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ПБ 03-440-02) Госгортехнадзора вводят уже 11 методов НРК: ультразвуковой, акустико-эмиссионный, радиационный, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами (капиллярный и течеисканием), визуальный и измерительный, вибродиагностический, электрический, тепловой, оптический. В целом, классификация методов НРК не успевает за разработкой все новых способов испытаний материалов и изделий, многие из которых используют комбинацию разнообразных физических феноменов.

Тепловой метод НРК основан на регистрации возмущений, вносимых внутренними дефектами в регулярный (эталонный) характер распространения тепловых потоков в объекте контроля. На практике анализируют двумерное нестационарное распределение температуры на поверхности объекта контроля, причем информативными признаками скрытых дефектов являются локальные температурные сигналы или характерные времена теплопередачи.

Аппаратурную базу теплового контроля (ТК) составляют инфракрасные (ИК) системы измерения температуры, в особенности, тепловизоры. Современные тепловизоры являются измерительными приборами, используют охлаждаемые и неохлаждаемые матричные приемники ИК излучения и обеспечивают следующие параметры: 1) формат кадра - от 128x128 до 1024x1024 пикселей; 2) спектральный диапазон 3...5 мкм и 7...13 мкм; 3) частота кадров - до 1000 Гц; 4) глубина оцифровки сигнала - 12, 14 и 16 бит. В портативных тепловизорах массой от 0,7 до 3 кг возможна цифровая запись до 1000 термограмм.

2. Историческая справка

Техника регистрации ИК излучения берет свое начало в 1800 г. в работах сэра Уильяма Гершеля, астронома при дворе английского короля Георга III. В 1829 г. Л. Нобили создал первую термопару, работа которой была основана на термоэлектрическом эффекте, открытом Т. Зеебеком в 1821 г. Прообразом первых тепловизоров можно считать устройство Д. Гершеля (брата У. Гершеля), который регистрировал тепловое излучение объектов по неравномерному испарению спирта на тонкой фильтровальной бумаге. В 1857 г. А. Сванберг изобрел новый приемник ИК излучения - болометр. В 1900 г. произошло второе рождение ИК методов исследований в качестве строгой научной дисциплины, что было обусловлено фундаментальными исследованиями М. Планка, Г. Кирхгофа, Б.Б. Голицына, В. Вина в области теории теплового излучения и прогрессом в технологии ИК приемников. Часто считают, что прообразом современных тепловизоров с оптико-механическим сканированием явился бортовой тепловизор фирмы Barnes, США, разработанный в 1954 г. и положивший начало так называемым "впередсмотрящим" ИК системам (Forward Looking Infrared - FLIR).

Отечественные разработки в 80-90-х годах прошлого столетия развивались по нескольким направлениям. Прежде всего, в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова под руководством М.М. Мирошникова развивалась оригинальная теория оптико-электронных устройств, на основе чего, совместно с Азовским оптико-механическим заводом, были разработаны тепловизоры как военного, так и гражданского применения: "Филин", "Рубин", "Алмаз", "Радуга", "Статор",

"Вулкан" и их модификации. Параллельно в НИИ "Исток" А.Г. Жуковым разрабатывалась концепция отечественного тепловизора ТВ-03. Упрощение требований к некоторым параметрам тепловизоров, например, за счет увеличения времени кадра, позволило организовать выпуск тепловизоров малой серии АТП (Московский Институт Радиотехники, Электроники и Автоматики - МИРЭА). Наконец, в НПО "Спектр" была сделана попытка повторить шведские тепловизоры на альтернативной отечественной элементной базе (тепловизор ИФ-10ТВ). Специализированные тепловизоры, предназначенные для исследования распределения энергии в мощных лазерных пучках, были разработаны во Всесоюзном научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) и Институте прикладной механики (ИПМ) СО АН СССР. Бортовые тепловизионные системы военного применения были разработаны в те годы в Государственном институте прикладной оптики (ГИПО). Существенный вклад в разработку отечественной тепловизионной аппаратуры тех лет внесли М.М. Мирошников, Р.Н. Иванов, А.Г. Жуков, В.Е. Абрамчук, Г.А. Падалко, Н.Д. Куртев, В.И. Хахин, С.С. Воронцов, В.Г. Федчишин, С.П. Морозова и П.А. Морозов и др.

Работы Томского НИИ интроскопии в данной области, начатые в 70-х годах прошлого века по инициативе В.И. Горбунова, были ориентированы на НРК, техническую диагностику и специальные применения. В лучшие времена штат отдела ТК достигал 30 человек. В настоящее время, по данной тематике работают до 10 специалистов. В различные годы вклад в томские исследования внесли Б.Н. Епифанцев, С.Ю. Танасейчук, А.Ф. Шерстюк, Г.Х. Гефле, М.С. Яманаев, С.Т. Чигарев, С.В. Финкельштейн, А.Н. Фурсов и авторы настоящей статьи. Область исследований включает теоретические решения прямых и обратных задач ТК, проектирование и мелкосерийный выпуск ИК сканирующих систем, разработку новых способов ТК и алгоритмов обработки нестационарной информации, а также техническую диагностику промышленных, энергетических и строительных объектов [1].

В конце прошлого века томские исследователи установили тесные научные контакты с ведущими мировыми специалистами в США, Канаде, Великобритании, Италии, Франции, Германии и Японии, что позволило объединить западные технологии и российские достижения в области ТК. Ряд сотрудников отдела прошли длительные зарубежные стажировки и публикуют результаты исследований в ведущих мировых журналах. В.П. Вавилов представляет интересы стран СНГ в Европейской рабочей группе по ИК термографии "Евротерм" и является членом Американского Общества Неразрушающего Контроля, Международной Академии ИК Термографии и оргкомитетов ряда международных конференций.

3. Разработка теории ТК

В основе теории ТК лежат решения задач теплопроводности для твердых тел с внутренними дефектами. Постановка прямых задач ТК тривиальна и не представляет интереса с академической точки зрения: твердое тело, состоящее из нескольких подобластей, часть из которых моделируют дефекты, нагревают на поверхности или в объеме; на поверхности тела имеют место смешанные граничные условия II и III рода; целью решения является определение поверхностной температурной функции. Разработанные в Томском НИИ интроскопии программные продукты для решения задач ТК описаны в табл. 1. В качестве аналитических решений одномерных задач ТК используют классические решения теории теплопроводности, приведенные в монографии А.В. Лыкова (программа Multilayer-3) [2]. Однако практический интерес представляют двух- и трехмерные задачи ТК, моделирующие дефекты конечных размеров (программы ThermoCalc-2D и ThermoCalc-3D). Решения этих задач были получены численными методами еще в 70-е годы прошлого века. Примечательно, что решение трехмерной задачи с числом узлов в сетке около 1 млн, выполненное В.П. Вавиловым на самом мощном в мире (в то время) стационарном компьютере CDC-7600, требовало от 10 до 100 минут вычислительного времени [3]; в настоящее время расчет сеточной модели с несколькими миллионами узлов на персональном компьютере с помощью программы ThermoCalc-3D занимает несколько минут.

Решения прямых задач ТК поставляют информацию о связях информативных параметров обнаружения с параметрами внутренних дефектов и условиями теплового стимулирования, на базе которой возможна оптимизация процедур выявления дефектов определенного типа.

Однако наибольший - как академический, так и практический - интерес представляют решения обратных задач ТК, которые по сути являются обратными задачами теории теплопроводности. Постановка этих задач типична для технической диагностики: по параметрам поверхностных температурных полей следует оценить параметры скрытых дефектов. Некорректность постановки обратных задач состоит в том, что из-за наличия аддитивных и мультипликативных помех одному и тому же набору входных температурных данных могут соответствовать различные наборы определяемых дефектных параметров: глубины залегания и размеров дефектов. В программе ThermoFit реализовано два вида решения обратных задач: 1) инверсионные соотношения для определения глубины залегания и толщины дефектов; 2) алгоритм динамической тепловой томографии, позволяющий воссоздавать структуру объекта контроля в пределах выделенного глубинного слоя. Последний алгоритм, предложенный В.П. Вавиловым и В.В. Ширяевым в 1984 г., был экспериментально реализован в 1989 г.

Таблица 1. *Специализированные компьютерные программы для решения задач ТК*

Программа	Описание
	Теоретическия решения задач ТК
Multilayer-3	Аналитическое решение задачи нагрева прямоугольным импульсом неадиабатической трехслойной пластины
ThermoCalc-2D	Численное решение задачи нагрева трехслойного дискообразного тела с концентрическим дефектом в виде диска (двухмерная цилиндрическая модель). Нагрев прямоугольным и синусоидальным импульсом. Тепловые волны. Адаптивный учет конвекции и излучения
ThermoCalc-3D	Численное решение задачи нагрева трехслойного параллелепипеда с 9-ю дефектами в форме параллелепипедов. Нагрев прямоугольным и синусоидальным импульсом. Использование пространственной маски нагрева (искусственной и экспериментальной). Создание последовательности искусственных ИК изображений
Обжиг R-φ-Z	Численное решение задачи нагрева трехслойного цилиндра с дефектами внутренней оболочки, имеющего встроенный источник тепловой энергии (трехмерная цилиндрическая модель). Решение обратной задачи теплопроводности. Учет процессов: конвективный и лучистый теплообмен с окружающей средой на внешней поверхности, теплообмен путем теплопроводности внутри материалов корпуса, конвективный и лучистый теплообмен с внутренним источником тепловой энергии, вращение цилиндра вокруг оси, перемещение обжигаемого материала
	Обработка экспериментальных данных
ThermoStat	Статистическая обработка изображений, определение отношения сигнал/шум для выбранных зон и построение карт дефектов
ThermoFit	Развитая обработка последовательностей ИК изображений: тепловая томография, полиномиальная аппроксимация, преобразование Фурье
Термоинспектор	Обработка двумерных тепловых портретов, дефектометрия, анализ дополнительных параметров (метео- и теплотехнических), работа в реальном масштабе времени в комплексе с ИК линейным сканером, управляющие воздействия на объект контроля

совместно со специалистами из Университета Уэйна (США) [4]. В последующие годы тепловая томография была признана мировым сообществом и сейчас является одним из наиболее достоверных способов обработки экспериментальных данных ТК.

4. Аппаратура ТК

В 70-90-е годы прошлого века в СССР господствовала тенденция использовать отечественную аппаратурную и элементную базы, прежде всего, в областях, имеющих стратегическое значение. В области ИК техники широкого применения отставание отечественных разработок от западных составляло 10...15 лет, поэтому зачастую новые научные и технологические идеи проверялись с использованием зарубежных тепловизоров, после чего создавали отечественные системы. В Томском НИИ интроскопии был разработан ряд устройств и систем ТК, перечисленных в табл. 2, часть из которых были выпущены малыми сериями ("ТАУ", "ИНТРОКОН"), а часть были созданы в единственных экземплярах (дефектоскоп ФИД-1, система лазерного контроля режущего инструмента, система ИКСА-01).

В настоящее время сохранили конкурентоспособность лазерная установка для импульсного ТК, система обнаружения воды в самолетных панелях и система "ИНТРОКОН", выпускаемые малыми партиями. Что касается системы активного ТК дефектов в композиционных и слоистых изделиях, то акцент в исследованиях последних лет смещается в область разработки развитого софтвера (см. табл. 2).

5. Перспективные применения ТК

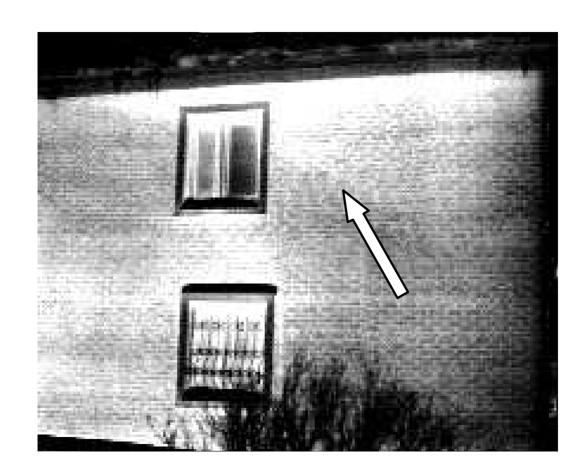
5.1. Строительные сооружения и объекты искусства

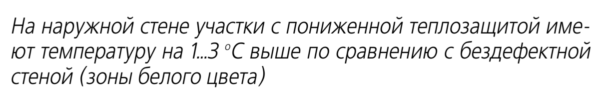
Полигоном для внедрения результатов исследований в области строительной диагностики был выбран г. Северск Томской области. Результатом сотрудничества с администрацией города явился выпуск в 1998 г. Постановления Главы Администрации № 24128 от 06.11.98 г. об обязательной тепловизионной диагностике всех новых жилых домов. Фактически к настоящему времени ряд строительных фирм, работающих в г. Северске, закладывают расходы на строительную диагностику в смету строительства. Тепловизионная диагностика успешно используется жилищно-коммунальными службами при приемке жилья и расследовании жалоб жильцов на тепловой дискомфорт в квартирах. Работы по энергосбережению и контролю дефектов в строительстве выполнялись в г. Сургуте, Москве, Томске, Новосибирске. Примеры термограмм, полученных при обследовании жилых зданий, приведены на рис. 1.

В 2001 г. совместно с фирмами ОРГРЭС (г. Новосибирск) и ВЕМО (г. Москва) разработана методика "Диагностика и определение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизион-

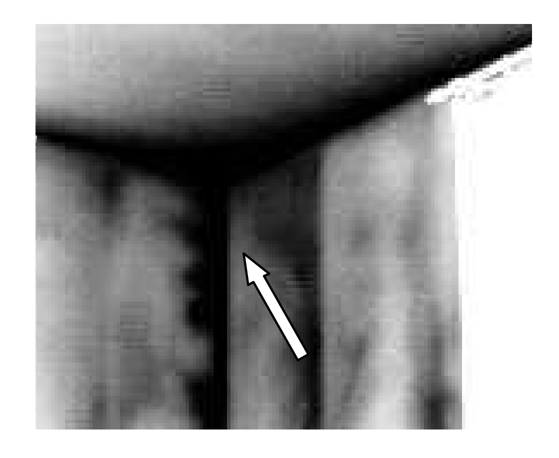
Таблица 2. *Устройства ТК, разработанные в Томском НИИ интроскопии*

Устройство	Описание и область применения
Фоторегистрирующий ИК дефектоскоп ФИД-1	Предназначен для обнаружения непропаев в металлических паяных конструкциях с использованием линейного нагрева и строчной системы записи температуры
Устройство «ТАУ» для дефектоскопии и экспрессного измерения температуропроводности	Образец нагревают с помощью импульсной лампы энергией 500 ... 2000 Дж. Температурный отклик на противоположной поверхности образца используют для разбраковки и/или определения температуропроводности материала по методу Паркера. Использован для дефектоскопии заготовок мощных тиристоров и экспрессного определения температуропроводности углепластиков
Цифровой преобразователь термограмм с памятью ЦПТП-1	Один из первых в России цифровых интерфейсов к отечественным тепловизорам
Лазерная установка для экспрессного определения рабочего ресурса режущего инструмента (по контракту для компании Robert Bosch, Германия)	Установлено, что срок службы режущего инструмента хорошо коррелирует с его температуропроводностью. Импульсный лазер энергией до 20 Дж нагревает одну из поверхностей режущего инструмента, а температурный отклик на противоположной поверхности используют для оценки срока износа режущей кромки.
Аппаратура и методика оценки влагосодержания в теплозащитном покрытии космического челнока	Разработан пассивный и активный метод ТК воды в пористой теплоизоляции корабля-челнока «Буран» на базе отечественного тепловизора ТВ-03. Отличие от аналогичных исследований в США состоит в возможности приближенной оценки массы воды в теплозащитных плитках
Система активного ТК композиционных и слоистых изделий	Система включает быстродействующий тепловизор (ТВ-03, Thermovision-570), устройство оптического нагрева на базе галогенных кварцевых ламп и/или ксеноновых ламп, компьютер и программный продукт (см. табл. 1). Использована для обнаружения дефектов в теплозащите ракет и воды в сотах самолетов
Система контроля качества и управления процессом термовлагообработки железобетонных конструкций	Сеть термодатчиков, блок управления и модуль исполнительных механизмов, встроенных в коммуникации пароснабжения пропарочных камер завода ЖБИ. Предназначена для реализации энергосберегающих технологий (экономия технологического пара) и автоматизации процесса «сушки» железобетонных изделий
Автоматизированная ИК система контроля температуры коксового «пирога» «ИКСА-01»	Включает набор стационарных пирометров, ИК канал дистанционной связи, блок обработки, отображения и сбора данных. Предназначена для оценки качества кокса, анализа теплового баланса коксовой батареи и дефектоскопии камер коксования
Строчно-сканирующая автоматизированная система контроля теплового состояния вращающихся обжиговых печей «ИНТРОКОН»	Оригинальный ИК линейный сканер и программно-аппаратное устройство на его основе, не уступающее оборудованию серии Thermoprofile фирмы FLIR Systems (США). Изготовлено более 30 устройств, эксплуатируемых на 7 отечественных цементных заводах для непрерывной дефектометрии теплоизоляции и контроля теплового баланса вращающихся обжиговых печей





На наружной стене участки с пониженной теплозащитой имеют температуру на 1...3 °С выше по сравнению с бездефектной стеной (зоны белого цвета)



На внутренней стене участки с пониженной теплозащитой имеют температуру на 5...8 °С ниже по сравнению с бездефектной стеной (зоны черного цвета)

Рис. 1. *Применение тепловидения в строительной диагностике*

ным методом", утвержденная Госстандартом РФ [5].

В течение 10-ти лет сотрудники Томского НИИ Интроскопии принимают участие в программе сохранения памятников старины в Италии. В частности, разработанный в НИИ ИН метод тепловой томографии был применен для обнаружения дефектов фресок Джотто, Фоголини и других художников в Падуе, Милане и других городах.

5.2. Дымовые трубы тепловых станций и промышленных предприятий

Кирпичные и железобетонные дымовые трубы (ДТ) представляют собой многослойные конструкции, в которых возможны дефекты сплошности (присосы атмосферного воздуха) и теплозащиты (оседание минералватных матов, коррозия ствола и т.п.). В течение длительного времени основным методом НРК ДТ был визуально-измерительный. С 1998 г. Минэнерго РФ и РАО "ЕЭС России" разрешили использовать тепловидение в качестве дополнительного, а, в ряде случаев, альтернативного, метода контроля. К настоящему времени обследовано более 50 труб тепловых станций и нефтехимических предприятий. Методические основы тепловизионной диагностики ДТ аналогичны контролю зданий. В 2002 г. разработана и утверждена "Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газоходов" [6]. По нашему мнению, обследования ДТ представляют собой растущий рынок тепловизионных услуг.

Примеры термограмм ДТ приведены на рис. 2.

5.3. Электроустановки

Электроустановки различного типа являются благодарным объектом ТК, поскольку возможные дефекты характеризуются стационарными температурными сигналами значительной амплитуды. В системе Минэнерго РФ тепловизионный метод является обязательным при испытаниях электрооборудования различного типа, в основном, благодаря работам фирмы ОРГРЭС. Авторами этот метод был использован на Томской дистанции электроснабжения для 100 %-й диагностики контактов открытых и закрытых распредустройств, что позволило отказаться от услуг ремонтников и установить межремонтный период равным 1 году. Аналогичные работы были выполнены для Воткинской ГЭС, предприятия "Омскэнерго" и "Пермьтрансгаз". Примеры термограмм дефектных электротехнических устройств приведены на рис. 3.

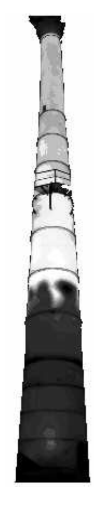
Выполнен цикл работ по диагностике стекловаренной печи Томского электролампового завода. Первичный осмотр был проведен непосредственно за капитальным ремонтом печи, причем полученные температурные распределения послужили эталоном при повторном осмотре три года спустя, в результате которого были обнаружены недопустимые перегревы ряда участков теплозащиты печи.

5.4. Авиационные сотовые панели

В силу конструктивных особенностей, авиационные сотовые панели, использующиеся в современных отечественных самолетах ТУ-204, ИЛ-86, ИЛ-96, могут содержать внутренние дефекты, которые отличаются от дефектов, характерных для сплошных материалов. Выделяют два типа таких дефектов: дефекты связи обшивки и ячеек; воду, полностью или частично заполняющую ячейки сот. Первый тип дефектов характерен как для стадии изготовления, так и эксплуатации самолетов. Дефекты второго типа возникают в процессе эксплуатации самолетов, будучи вызванными водой, проникающей в соты через неплотные соединения. Заметим, что зачастую именно вода в сотах способна вызвать отслоения обшивки от сот и коррозию ма-



Многочисленные присосы атмосферного воздуха в стволе кирпичной трубы имеют пониженную температуру (зоны черного цвета)



В футерованной изнутри металлической трубе видно разрушение верхней части футеровки, достигающей 30 % высоты ДТ

Рис. 2. *Тепловой контроль дымовых труб*

териала ячеек.

Из вышесказанного ясно, что обнаружение воды в авиационных сотовых панелях является важной научно-технической задачей, связанной с обеспечением надежности самолетов и, в конечном счете, поддержанием безопасности полетов на требуемом уровне.

Используя опыт европейского концерна Airbus Industries, в 2002 г. совместно с компанией ПЕРГАМ был выполнен цикл работ по контролю самолетных панелей в условиях ангара, а также на взлетно-посадочной полосе (на предприятиях "Сибирь" и ИСТ ЛАЙН).

Различают пассивный и активный способ диагностики воды в сотовых панелях. Пассивный способ применим к сотовым панелям, изготовленным из полимерных композитов, непосредственно после посадки самолетов. При этом температурный перепад создается разницей между наземной температурой и температурой за бортом в крейсерском режиме полета. Две характерные термограммы, полученные на композитных панелях самолета ТУ-204, показаны на рис. 4. Вода в силу своей высокой теплоемкости сохраняет низкую температуру в течение длительного времени, в то время как несущие конструкции нагреваются окружающей средой. На термограммах вода видна в виде холодных зон, форма и размер которых отражают реальное распределение воды в ячейках сот.

Для контроля дюралюминиевых панелей пассивный способ практически неприменим из-за "смазывания" температурных сигналов вследствие высокой теплопроводности алюминия. В этом случае необходимо применять активный способ, предусматривающий нагрев контролируемых изделий с помощью внешнего нагревателя. В настоящее время применяют оптические нагреватели и воздушные пушки. Для оптического нагрева применяют несколько галогенных ламп мощностью 1...2 кВт; при этом основной практической проблемой является наличие бликов отражения от блестящей поверхности, что затрудняет анализ термоизображений. Воздушный нагрев решает эту проблему, но является менее мощным и, следовательно, применимым для обнаружения достаточно больших количеств воды. На рис. 5 показаны термограммы дюралюминиевой и стеклопластиковой (с алюминиевыми сотами) панели, полученные при оптическом нагреве. Зоны скопления воды остаются более холодными в процессе нагрева по сравнению с бездефектными участками. Существенное различие между термограммами состоит в том, что, в случае композитных сот отчетливо прослеживается структура ячеек, тогда как термограмма дюралюминиевых сот имеет более "смазанный" вид.

5.5.Вращающиеся обжиговые печи

Вращающиеся обжиговые печи, широко применяемые при производстве цемента и на предприятиях цветной металлургии, являются сложными тепловыми агрегатами, условия эксплуатации которых близки к экстремальным: температура внутри печи - 1500...1800 °С, угловая скорость вращения 1...2 об/мин, что при диаметре 3...6 м и длине до 200 м приводит к значительным деформациям и вибрации корпуса печи. Учитывая, что остановка и ремонт такого агрегата является очень дорогим мероприятием, становится очевидным, как важен непрерывный контроль теплового режима работы печи и целостности теплозащитного и футеровочного слоев ее корпуса.

НИИ интроскопии на протяжении ряда лет занимается научными исследованиями, связанными с анализом тепловых и механических процессов, происходящих при обжиге материалов в подобных агрегатах. Теоретическим результатом работ явилось создание нескольких вариантов двух и трехмерных имитационных математических моделей печи [7]. Компьютерная реализация моделей получила название "Обжиг R-φ-Z". Практическое направление исследований было ориентировано на разработку инфракрасных систем автоматизированного контроля корпусов вращающихся обжиговых печей "ИКСА" и "ИНТРОКОН". Для их серийного производства были разработаны Технические условия ЖТАБ 2.820.000 ТУ "ИК система автоматизированного контроля температуры поверхности печи обжига клинкера", согласованные с отрасле-



Перегрев болтового соединения более чем на 30 °С означает необходимость немедленного ремонта



Перегрузка фазы (справа) трехфазной сети

Рис. 3. *Тепловой контроль электротехнических устройств*

выми организациями Концерн "Цемент" и ОАО "ВИАСМ". Первичным датчиком указанных систем является оригинальный линейный сканер, чувствительный к электромагнитным излучениям в ИК области спектра. Его данные о тепловом излучении объекта контроля обрабатываются микропроцессорным блоком по уникальному алгоритму, позволяющему обнаружить внутренние дефекты оболочки печи, определить их координаты, размеры и степень опасности, оценить надежность печного агрегата. Полученная информация позволяет оперативно устранять опасные дефекты без остановки печи (в частности, посредством создания систем с обратной связью, формирующих охлаждающее воздействие на обнаруженные зоны перегрева воздушноводяной эмульсией). Зарегистрированные термограммы подлежат архивированию, накоплению и хранятся в течение длительного времени, что позволяет проследить процесс износа внутренней поверхности печи за межремонтный период.

С 1992 по 2002 годы изготовлено и внедрено более тридцати ИК систем контроля "ИКСА" и "ИНТРОКОН" на предприятиях Российской Федерации. В настоящее время выпускается пятое поколение подобных систем. Они имеют более высокие метрологические параметры, надежность, несколько уровней контроля, оснащены лазерным указателем поля обзора, могут комплектоваться цифровым каналом радиосвязи. Для обработки информации в подобных системах разработана специализированная программа "Термоинспектор", на которую получен патент РФ, рис. 6 [8]. Программа снабжена специальными опциями для цифровой фильтрации изображений, установки пороговых значений температуры по пяти зонам контроля, звуковой сигнализации, выбора диапазона измерения температур, построения теплового портрета печи в изометрии, инверсии изображения, выделения изотерм, расчета толщины теплозащитного слоя обмазки и др. "Термоинспектор" позволяет получать данные от нескольких (до восьми) ИК пирометров, объединенных в единую сеть локальной линией связи.

5.6. Противопехотные мины

Обнаружение противопехотных мин, миллионы которых были размещены во Вьетнаме, Лаосе, Камбодже, Афганистане, Кувейте, Югославии и других регионах, включая Чечню, является важной гуманистической задачей, решением которой занимаются помимо военных структур такие организации, как ООН, ЮНЕСКО и т.п. Оптимальный метод обнаружения мин должен быть оператив-



Рис. 4. *Пассивное обнаружение воды в композитных сотовых панелях элерона (а) и фюзеляжа (б) самолета ТУ-204*

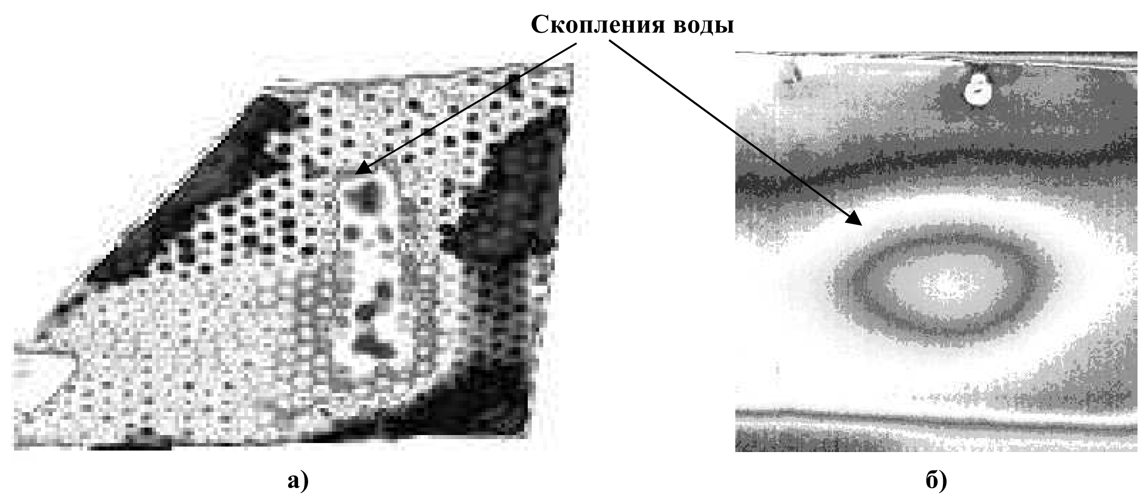


Рис. 5. *Активное обнаружение воды в сотовых панелях, изготовленных из композита (а) и алюминия (б)*

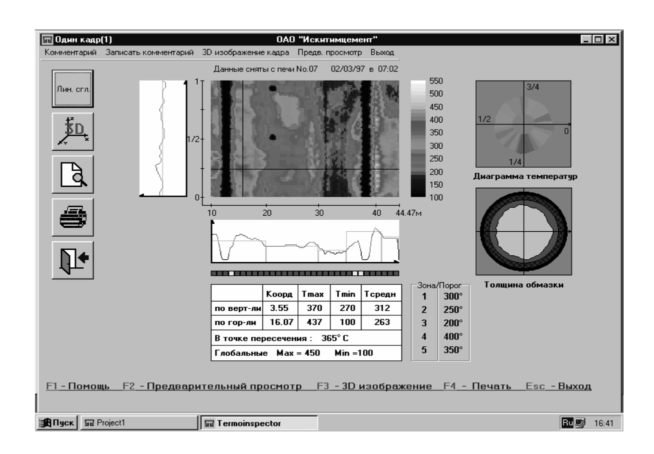


Рис. 6. *Фрагмент изображения на мониторе ИК системы "ИНТРОКОН 04Ц" (позволяет обнаружить дефектные участки, определить их координаты и размеры, оценить толщину теплозащитной обмазки)*

ным, надежным и безопасным. В настоящее время наиболее надежным является использование обученных собак, а множество разработанных технических методов и средств обнаружения страдают теми или иными недостатками и, как правило, требуют комбинирования друг с другом. Инфракрасный метод является одним из нескольких перспективных методов, которые постоянно обсуждаются на международных конференциях (ежегодная конференция по данной тематике проходит в США, не считая многочисленные совещания многочисленных комитетов и рабочих групп).

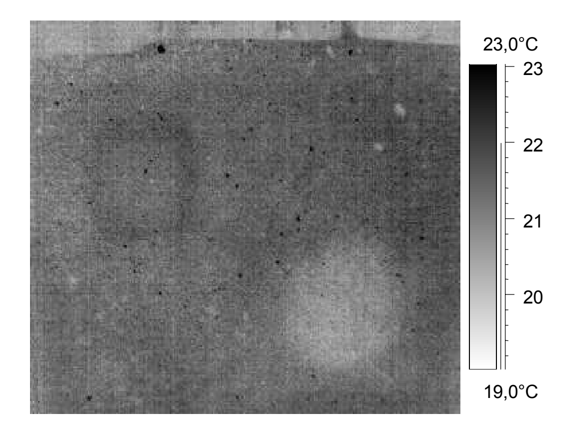


Рис. 7. *Термограмма участка увлажненного песка с металлической противопехотной миной (слева внизу) и парафиновым имитатором (справа вверху) безоболочечной мины (3 часа дня, естественный нагрев, глубина заложения мин 2 см)*

Работы НИИ ИН в данной области, в основном, направлены на развитие компьютерных программ, предназначенных для моделирования процесса обнаружения и обработки экспериментальных данных. Моделирование направлено на определение оптимальных условий обнаружения, поскольку температурный сигнал над скрытой миной зависит от времени суток, параметров солнечной иррадиации, глубины залегания мины, теплофизических свойств почвы и мины. Целью обработки сигнала является повышение отношения сигнал/шум, поскольку температурные "отпечатки" скрытых мин легко теряются на фоне многочисленных помех.

Пример термограммы двух мин различного типа, залегающих на глубине 2 см, показан на рис. 7. Плотность естественного солнечного нагрева была невелика (от 30 до 240 Вт/м^2), поэтому температурные сигналы не превышали 1 °С.

6. Заключение

Специфика теплового метода неразрушающего контроля и технической диагностики состоит в его универсальности, обусловленной тем фактом, что информативным параметром качества исследуемых объектов является температура. Температура служит неотъемлемым индикатором работы технических установок и сложных систем, а также характеризует структурные и тепловые процессы в конструкционных материалах. Расшифровка температурных распределений поставляет информацию о разнообразных процессах, протекающих в объектах контроля, однако платой за универсальность метода является высокий уровень помех, что снижает вероятность обнаружения дефектов и повышает вероятность ложной тревоги.

Теоретические работы Томского НИИ интроскопии направлены на разработку современного программного продукта, предназначенного как для моделирования и оптимизации процедур контроля, так и для обработки экспериментальных данных. Разработан ряд алгоритмов обработки результатов теплового контроля, например, тепловая томография, которые улучшают статистические характеристики обнаружения и признаны мировым сообществом.

Практическое направление исследований связано с созданием автоматизированных систем термографического контроля и управления для стройиндустрии, способных обеспечить достойную конкуренцию отечественным и зарубежным аналогам на Российском рынке.

В сфере услуг на базе современных тепловизоров расширяется применение теплового контроля в таких областях, как строительство, энергетика, авиация и ряде специальных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В.П., Иванов А.И., Ширяев В.В. и др. Обзор исследований в области теплового неразрушающего контроля в Томском НИИ интроскопии // Изв. ТПУ "Неразрушающий контроль и диагностика". - Томск: Изд-во НТЛ, 1998. - С. 13-18.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 604 с.
3. Vavilov V., Taylor R. Theoretical and Practical Aspects of the Thermal NDT of Bonded Structures. - In: "Res. Techn. in NDT", Vol. 5, ed. by R. Sharpe, Academic Press, London, U.K., 1982. - P. 239-280.
4. Вавилов В.П., Джин Х., Томас Р., Фавро Л. Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве // Дефектоскопия. - 1990. - № 12.
5. Диагностика и определение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом (методика). - Свид. об аттестации МВИ Госстандарт РФ № 1305/442 от 10.01.2001, Госстандарт РФ. - 36 с.
6. Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газоходов. - Свид. об аттестации МВИ № 11/442 от 6.03.2002, Госстандарт РФ. - 44 с.
7. Torgunakov V. G., Sukhanov M. S. Computer Model of Thermal Processes in a Cement Kiln // The 7th European Conference on Non-Destructive Testing. - Copenhagen, Denmark, 1998. - P. 2676-2679.
8. Торгунаков В.Г., Яманаев Н.М., Яманаев М.С. Свидетельство РФ № 2000610040, Автоматизированная система дистанционного контроля температуры промышленных установок ("Термоинспектор"), РОСПАТЕНТ, 18.01.00.

УДК 620.179.155